



مطالعه آزمایشگاهی نحوه انتشار شعله پیش آمیخته متان-هوا در محفظه بسته با حضور مانع متخلخل

حبیب کلاهدوز^۱، محمد حسن کیهانی^۱، محسن نظری^{۱*}، رضا ابراهیمی^۲

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۸-۱۶

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۰-۲۱

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۲۹

کلمات کلیدی:

احتراق

مخلوط استوکیومتری متان-هوا

مانع متخلخل

محفظة بسته

شعله گل لاله

خلاصه: نحوه انتشار و شکل جبهه شعله پیش آمیخته استوکیومتری متان-هوا در یک محفظه بسته با ابعاد $8 \times 11 \times 50$ cm و اثر مانع متخلخل با درصد تخلخل ۹۵ با ۲۰ حفره در اینچ مربع در مسیر جریان، مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفته است. رفتار شعله به کمک عکس برداری با دوربین سرعت بالا مطالعه شده که جهت عکس برداری یک وجه محفظه با ابعاد 5×8 cm از جنس پلکسی گلس شفاف ساخته شده است. تغییرات فشار داخل محفظه به کمک سنسور و مبدل فشار که در بالای محفظه نصب شده ثبت می گردد. دامنه تغییرات فشار و محل تشکیل شعله گل لاله نیز با نمونه کارهای مرجع معتبرسازی شده است. موقعیت مکانی مانع متخلخل برای چهار فاصله مختلف ۵ cm، ۱۰ cm، ۱۵ cm و ۲۰ cm از محل جرقه مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج برای چهار حالت با حضور مانع متخلخل نشان می دهد که آشفته گی ایجاد شده در میدان جریان می تواند موقعیت مکانی تشکیل شعله گل لاله و همچنین زمان تشکیل آن را جابجا کند. برای فاصله ۲۰ cm مانع متخلخل از محل جرقه، آشفته گی میدان جریان به میزان حداکثر خود در بین ۴ فاصله مختلف مانع رسیده و جبهه شعله با تفاوت اساسی مشابه شعله گل لاله کلاسیک تشکیل می شود.

۱- مقدمه

منبسط شده و مخلوط نسوخته را به طرف جلو می راند. اصطکاک بر روی دیواره موجب غیر یکنواختی جریان سیال شده و جبهه شعله را خمیده می کند. به این ترتیب سرعت شعله افزایش یافته و شعله شتاب دار می شود. با این حال از زمان شلکین یک نظر مشترک وجود دارد که شتاب گرفتن شعله بدون جریان آشفته گی غیر ممکن است [۴]. پیشنهادهای دیگر در مورد شتاب گرفتن شعله مطرح شده است از جمله، ناپایداری هیدرودینامیکی لاند-داریوس^۲ [۵] و [۶] و حالت انتقال شعله کروی به شعله تخت هنگام انتشار شعله در داخل یک لوله [۷].

بایچکوف^۳ و همکاران [۴] تئوری تحلیلی در مورد شتاب گرفتن شعله آرام در لوله با یک انتهای بسته و شرط عدم لغزش در دیواره و آدیاباتیک بودن دیواره را توسعه داده اند. آن ها با توجه به تعریف رینولدز برای دینامیک احتراق که متفاوت از رینولدز استاندارد جریان می باشد، برای شتاب بی بعد شعله رابطه (۱) و همچنین برای سرعت

با افزایش نگرانی در مورد کمبود انرژی و تولید گازهای گلخانه ای، تحقیقات در مورد بهبود بازده حرارتی موتورهای احتراقی و کاهش انتشار گازهای آلاینده به موضوع اصلی تحقیقات در زمینه احتراق و همچنین توسعه موتورهای احتراقی تبدیل شده است [۱]. همچنین به دست آوردن شناخت از ساختار انتشار شعله پیش آمیخته در فضاهای محصور اهمیت بسیار ویژه ای جهت درک دینامیک انفجار گازها و فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی دارد [۲]. احتراق در محیط بسته دارای پیچیدگی بسیار بیشتری نسبت به احتراق در فضای باز بوده و انبساط حرارتی محصولات احتراق نقش کلیدی در شتاب اولیه شعله را دارد.

اولین توضیح در مورد شتاب گرفتن شعله توسط شلکین^۱ [۳] ارائه شده است. او بر اساس شرط عدم لغزش بر روی دیواره شتاب گرفتن شعله را توضیح داد. با انتشار جبهه شعله، مخلوط سوخته

2 Darrieus-Landau

3 Bychkov

1 Shelkin

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir

مرزی و غیره قرار می‌گیرد که آن را ناپایدار و نامنظم می‌سازد [۹-۱۳].

الیس^۲ [۱۰] برای اولین بار این پدیده را مشاهده کرد و دریافت که شکل شعله ناگهان از حالت انگشتی به حالت تخت و در مرحله بعد سریعاً به صورت مقعر به داخل مخلوط سوخته برگشت می‌کند. به کمک تکنیک‌های عکس‌برداری نشان داده شده است که شکل شعله تغییرات پیچیده‌ای دارد و جالب‌ترین حالت آن، شعله گل لاله^۳ نام دارد که توسط سالامندرا و همکاران^۴ اولین بار به این اسم نام‌گذاری شده است [۱۳]. بسیاری از مطالعات به دلیل پیچیدگی پدیده‌ی شعله گل لاله، بر روی آن تمرکز کرده‌اند و هم‌چنان نقاط ابهام و اختلاف نظر در آن وجود دارد. مارکستین^۵ [۱۴] دینامیک شعله مشابه گل لاله را برای شعله آرام در تعامل با موج فشاری را مشاهده کرد و این پدیده را با تئوری ناپایداری تیلور توضیح داد. اما استارک^۶ و همکاران [۱۵] و کلنت^۷ و سربی^۸ معتقد بودند که ناپایداری تیلور به دلیل کاهش سرعت نوک شعله است و نه به دلیل موج‌های فشاری، این کاهش سرعت به دلیل اثر خنک شدن شعله در تماس با دیوار محفظه بوده که نتیجه آن کاهش سطح جبهه شعله است. دان رانکین^۹ و همکاران [۱۶] و گنزالس^{۱۰} و همکاران [۱۷] به کمک شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که گرادیان سرعت عرضی در امتداد جبهه مسطح شعله و ناپایداری لاند-داربوس^{۱۱} نقش مهمی در وارونگی گل لاله ایفا می‌کنند. دان-رانکین [۱۸] پیشنهاد کرد که شعله لاله‌ای شکل در اثر ترکیب مکانیزم‌های مختلف می‌تواند ایجاد شود.

کلنت و سربی [۷] اولین تقسیم‌بندی تغییرات دینامیک شعله پیش‌آمیخته در محفظه باز و بسته را انجام داده‌اند که به چهار مرحله تقسیم می‌شود: (۱) شعله نیم‌کره در حال انبساط که هنوز تحت اثرات دیوارها قرار نگرفته است؛ (۲) شعله با حالت انگشتی و سرعت رشد نمایی؛ (۳) شعله کشیده که از ناحیه جانبی در تماس با دیواره قرار گرفته است؛ (۴) وارونگی جبهه شعله که به اسم شعله گل

سوزش رابطه (۲) را ارائه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش رینولدز میزان شتاب شعله کاهش پیدا می‌کند. به عنوان مثال با کاهش مقطع کانال (R) رینولدز کاهش پیدا کرده و در نتیجه آن شتاب بی بعد افزایش می‌یابد و با توجه به رابطه (۲) سرعت سوزش نیز افزایش می‌یابد. لازم به توضیح است که سرعت سوزش U_w با سرعت نرمال جبهه احتراق U_f متفاوت است. سرعت سوزش نشان می‌دهد که چه مقدار سوخت بر حسب زمان توسط کل جبهه شعله مصرف شده است.

$$\sigma = \frac{\Theta^2}{\text{Re}_{\text{flame}}}, \text{Re}_{\text{flame}} = \frac{RU_f}{\nu}, \Theta = \frac{\rho_f}{\rho_b} \quad (1)$$

$$U_w \propto \exp(\sigma \cdot \tau), \tau = U_f t / R \quad (2)$$

بایچکف و همکاران [۲] با توسعه حل تحلیلی برای شتاب گرفتن شعله آرام در مراحل اولیه رشد شعله در یک لوله طولانی و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی کلنت و سربی [۷] که برای مخلوط پروپان-هوا بدر داخل یک لوله که از یک انتها باز است، نشان داد که شتاب شعله مستقل از رینولدز شعله بوده و تنها به ضریب انبساط مخلوط ($\Theta = \frac{\rho_f}{\rho_b}$) وابسته است و همچنین برای موقعیت جبهه شعله در مراحل اولیه رشد رابطه (۳) را ارائه کرده‌اند.

$$\xi_{\text{tip}} = \frac{\Theta}{2\alpha} \sinh(2\alpha\tau), \xi_{\text{tip}} = \frac{Z_{\text{tip}}}{R}, \alpha = \sqrt{\Theta(\Theta-1)}, \tau = \frac{U_f t}{R} \quad (3)$$

که در آن ξ_{tip} محور طولی بی‌بعد، R شعاع لوله، Z محور طولی و τ زمان بی بعد می‌باشد.

والیف^۱ و همکاران [۸] با استفاده از نتایج تحلیلی بایچکف [۲] مدلی برای شتاب انتشار شعله در لوله با حضور مانع برای تحلیل فرآیند گذر از احتراق به انفجار به صورت رابطه (۴) ارائه کرده‌اند که در آن d ضخامت مانع، Δz فاصله دو مانع از یکدیگر و β نسبت انسداد است.

$$\sigma = (1-d/\Delta z) \frac{\Theta-1}{1-\beta} \quad (4)$$

در طی انتشار شعله در یک محفظه بسته شعله تحت تأثیر مجموعه‌ای از اثرهای مختلف از جمله نیروی شناوری، ناپایداری هیدرودینامیکی، ناپایداری نفوذ حرارتی، ناپایداری رایلی-تیلور، لابه

- 2 Ellis
- 3 Tulip Flame
- 4 Salamandra et al.
- 5 Markstein
- 6 Starke
- 7 Clanet
- 8 Searby
- 9 Dunn-Rankin
- 10 Gonzalez
- 11 Darrieus-Landau

1 Valiev



شکل ۱: نمای واقعی مجموعه آزمایشگاهی

.Fig. 1. Real view of the experimental apparatus

و ساختار شعله در مقایسه با متان خالص می‌گردد و در عین حال استیلن دارای سریعترین سرعت پخش شعله و فشار حداکثر به علت بالاتر بودن سرعت واکنش شیمیایی می‌باشد. چن^۵ و همکاران [۲۴] اثر تخلخل بر روی دیواره‌های محفظه بسته برای مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا را مورد مطالعه قرار داده است. او نشان داد مواد متخلخل روی دیواره در امواج عرضی شکل گرفته اثر گذاشته که موجب کاهش فاصله وارونگی جبهه شعله و به تأخیر افتادن آغاز شعله گل لاله شود. در کار حاضر رفتار شعله مخلوط متان-هوا با نسبت هم‌ارزی^۶ برابر یک در یک محفظه بسته در دو حالت: محفظه بدون مانع و با حضور مانع متخلخل در مسیر جریان احتراقی به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. حضور مانع متخلخل به دلیل ایجاد آشفستگی در میدان جریان احتراقی تأثیر ویژه‌ای بر سرعت احتراق و همچنین ساختار تشکیل جبهه شعله داشته و این مهم مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- شرح تجهیزات آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ و ۲ به صورت نمای واقعی و شماتیک نشان داده شده است. محفظه بسته احتراق دارای طول ۵۰ cm، ارتفاع ۸ cm و عمق ۱۱ cm می‌باشد. جنس ورق به کار رفته برای ساخت محفظه، فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ به ضخامت ۱.۵ mm می‌باشد. سطوح داخلی محفظه با استفاده از سمباده با درجه زبری ۴۰۰ به طور کامل صیقل داده شده است.

لاله نام‌گذاری شده است. شیائو و همکاران [۱۹] رفتار انتشار شعله پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا را در یک کانال افقی با مقطع مستطیل در حالت بسته و حالت انتهای باز را به طور تجربی برای نسبت‌های هم‌ارزی مختلف مطالعه کرده و نشان دادند که نسبت هم‌ارزی تأثیر قابل توجهی بر تشکیل شعله گل لاله دارد. شیائو^۱ و همکاران [۲۰] اثر موقعیت جرقه را در انتشار شعله پیش‌آمیخته هیدروژن-هوا در محفظه بسته، مورد مطالعه قرار داده و نشان داد که موقعیت جرقه تأثیر قابل توجهی بر دینامیک شعله دارد. شن^۲ و همکاران [۲۱] مطالعه آزمایشگاهی مشابه برای مخلوط هیدروژن-هوا و پروپان-هوا و مقایسه رفتار این دو مخلوط با هم انجام داده‌اند. زنگ^۳ و همکاران [۲۲] تأثیر درصد هیدروژن در مخلوط پیش‌آمیخته متان-هیدروژن-هوا و ابعاد محفظه بسته احتراق را به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده است. او نشان داد در مواردی که میزان هیدروژن کمتر بوده شکل شعله نامتقارن شده و قسمت پایینی هلالی شکل شعله گل لاله با سرعت کمتری نسبت به قسمت بالایی آن منتشر می‌شود. جین^۴ و همکاران [۲۳] رفتار جبهه شعله متان-هوا، استیلن-هوا و گاز طبیعی-هوا را به طور مشابه و آزمایشگاهی مطالعه کرده است. او نشان داد که ماهیت سوخت گازی تأثیر قابل توجهی بر سرعت انتشار شعله و شکل آن دارد. مقدار کم اتان و پروپان موجود در گاز طبیعی باعث افزایش شتاب انتشار شعله و افزایش فشار و اختلاف در شکل

-
- 1 Xiao
 - 2 Shen
 - 3 Zheng
 - 4 Jen

-
- 5 Chen
 - 6 Equivalence ratios

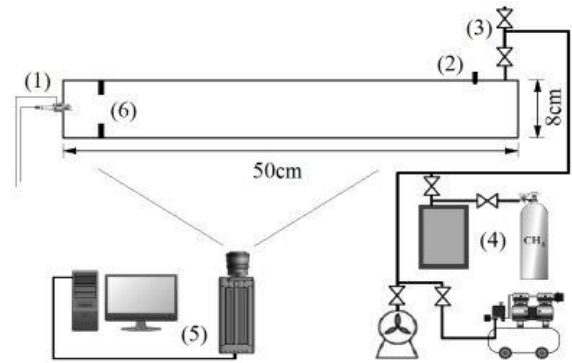


شکل ۳: تصویر مانع متخلخل در داخل محفظه در فاصله ۵ cm از محل جرقه

Fig. 3. Image of the porous obstacles inside the closed duct at a distance of 5 cm from the spark location

می‌دهد استفاده شده و جهت ثبت اطلاعات در کامپیوتر از ثبت‌کننده اطلاعات^۳ ADAM مدل ۶۰۱۷ با سرعت ۵۰ میلی‌ثانیه استفاده شده است.

برای تهیه مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا از یک محفظه اختلاط که از لوله آهنی بدون درز با قطر ۶ اینچ و ضخامت ۷ میلی‌متر و طول ۲۵ سانتی‌متر ساخته شده استفاده شده است. حجم محفظه اختلاط تقریباً ۵ درصد بزرگتر از محفظه احتراق طراحی شده است. فرآیند اختلاط به این صورت می‌باشد که ابتدا محفظه اختلاط دارای فشار نسبی صفر از هوای خشک خروجی کمپرسور پر بوده و به میزان ۰/۴ bar فشار متان با درجه خلوص ۹۹/۹۹ درصد به داخل محفظه اختلاط تزریق می‌شود. در ادامه تا فشار نسبی نهایی ۳ bar هوای خشک خروجی از کمپرسور به داخل محفظه تزریق می‌شود. با توجه به در نظر گرفتن فشار اولیه ۱ bar در محفظه احتراق برای انجام آزمایش‌ها، مخلوط آماده شده برای انجام سه دفعه آزمایش کافی می‌باشد. با استفاده از فشارهای نسبی مطلق هر گاز ($P_{ch_4} = 0/4 \text{ bar}, P_{air} = 3/6 \text{ bar}, P_T = 4 \text{ bar}$) کسر مولی متان و هوا در مخلوط تهیه شده با توجه به رابطه (۵) به ترتیب برابر $C_{ch_4} = 0/4/4 = 0/1, C_{air} = 3/6/4 = 0/9$ و برای حالت استوکیومتری با توجه به رابطه (۶) $C_{stoic-ch_4} = 1/0/52 = 0/095, C_{stoic-air} = 9/52/10/52 = 0/905$ می‌باشد. با توجه به رابطه (۷) و کسر مولی‌های گاز، نسبت هم‌آزری



شکل ۲: شماتیک مجموعه آزمایشگاهی (۱) جرقه‌زن (شمع) (۲) سنسور فشار (۳) ورودی و خروجی گاز (۴) مجموعه تهیه مخلوط پیش‌آمیخته و تزریق گاز (۵) دوربین سرعت بالا (۶) موانع متخلخل

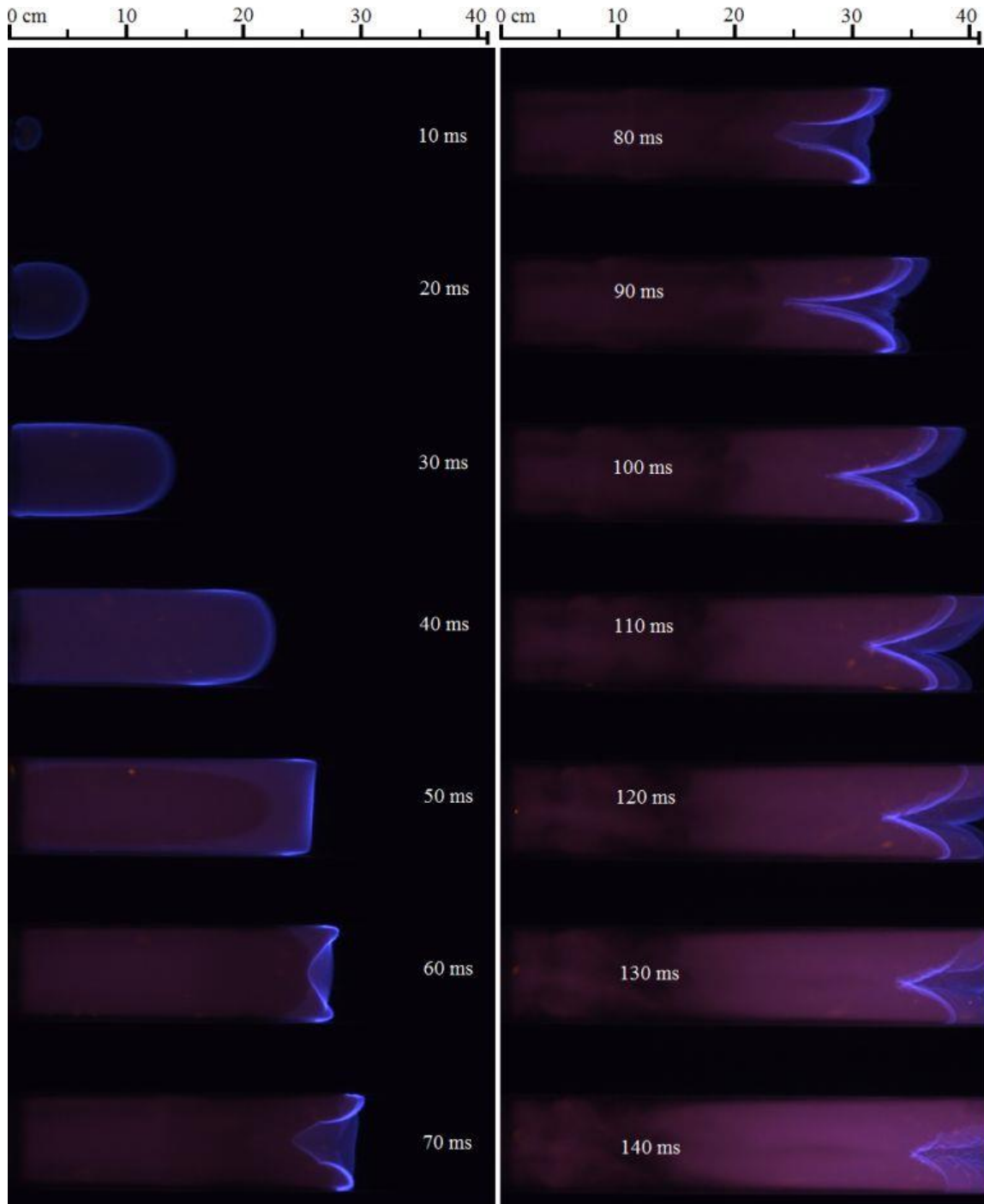
Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus including (1) spark plug, (2) pressure transducer, (3) charge and discharge valves, (4) gas mixing equipment, (5) high-speed camera and (6) obstacles. experim

جهت امکان تصویربرداری از شعله یک وجه محفظه (۸×۵ cm) از جنس پلکسی گلس^۱ شفاف با ضخامت ۲۰ mm استفاده شده است. جهت مطالعه و بررسی رفتار انتشار جبهه شعله با حضور مانع متخلخل، در یک مقطع از مسیر جریان دو مانع متخلخل که به صورت قرینه بر روی سطح پایینی و بالایی محفظه نصب شده، استفاده گردیده است. در شکل ۳ این مانع در فاصله ۵ cm از محل جرقه نشان داده شده است. جنس مانع از نیکل بوده که درصد تخلخل آن ۹۵ و دارای ۲۰ حفره در اینچ مربع می‌باشد. ابعاد مانع متخلخل ۱۱×۲×۰,۵ cm می‌باشد و در واقع به اندازه نصف مقطع جریان محیط متخلخل شده است. اثر این مانع در چهار فاصله مختلف از محل جرقه به صورت، حالت ۱: ۵ cm، حالت ۲: ۱۰ cm، حالت ۳: ۱۵ cm و حالت ۴: ۲۰ cm بررسی شده است.

جهت ایجاد جرقه از شمع که در مرکز وجه ابتدایی محفظه واقع شده و ترانس ولتاژ بالا استفاده شده است. عکس‌برداری به کمک دوربین dimax-s با قابلیت عکس‌برداری رنگی و سرعت ۴۵۰۰ فریم بر ثانیه بوده که برای کار حاضر با توجه به سرعت پدیده مورد نظر و حفظ کیفیت تصاویر، عکس‌برداری با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه انجام شده است. تغییرات فشار داخل محفظه به کمک مبدل فشار^۲ WIKA مدل S-۱۰ که در رنج فشار ۱۰-۰ bar اندازه‌گیری انجام

- 1 Plexiglass
- 2 Pressure transmitter

3 Data logger



شکل ۴: تصویر پیشروی جبهه شعله در محفظه حاوی مخلوط استوکیومتری متان-هوا در فشار ۱ bar

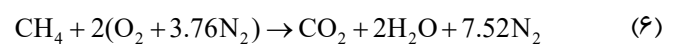
Fig. 4. High-speed images of premixed methane-air flame front in closed duct at a pressure of 1 bar.

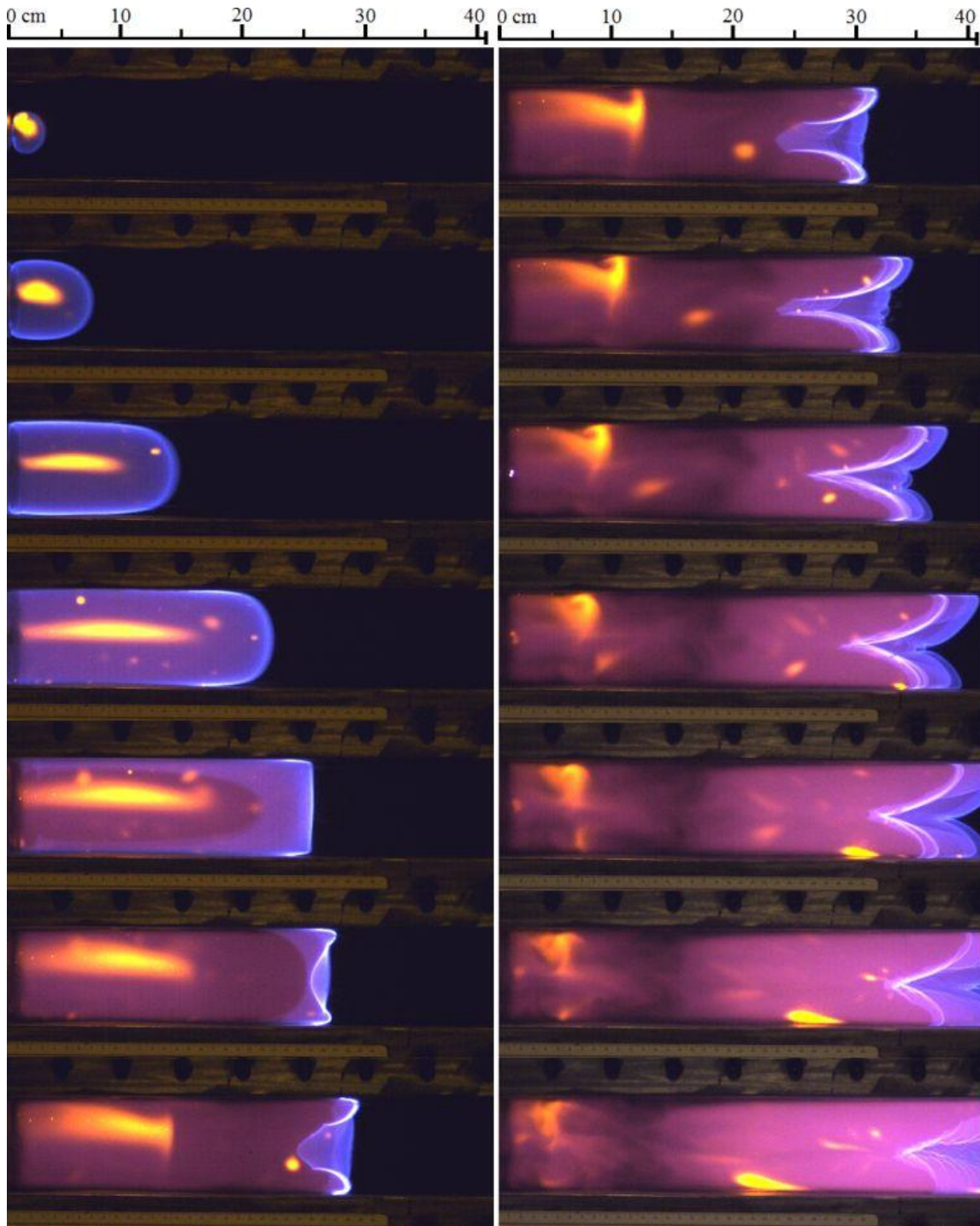
$$\varphi = \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoic}} \quad (7)$$

فرآیند تزریق مخلوط به محفظه احتراق به این صورت می‌باشد که، ابتدا داخل محفظه با هوای خشک کمپرسور جایگزین می‌شود و در ادامه فشار محفظه احتراق با کمک پمپ خلاء تا فشار مطلق ۰/۰۵ bar

مخلوط تهیه شده برابر $\varphi = \frac{0/1/0/9}{0/0/95/0/905} = 1/06$ خواهد شد.

$$C_i = \frac{n_i}{n_T} = \frac{P_i}{P_T} \quad (5)$$



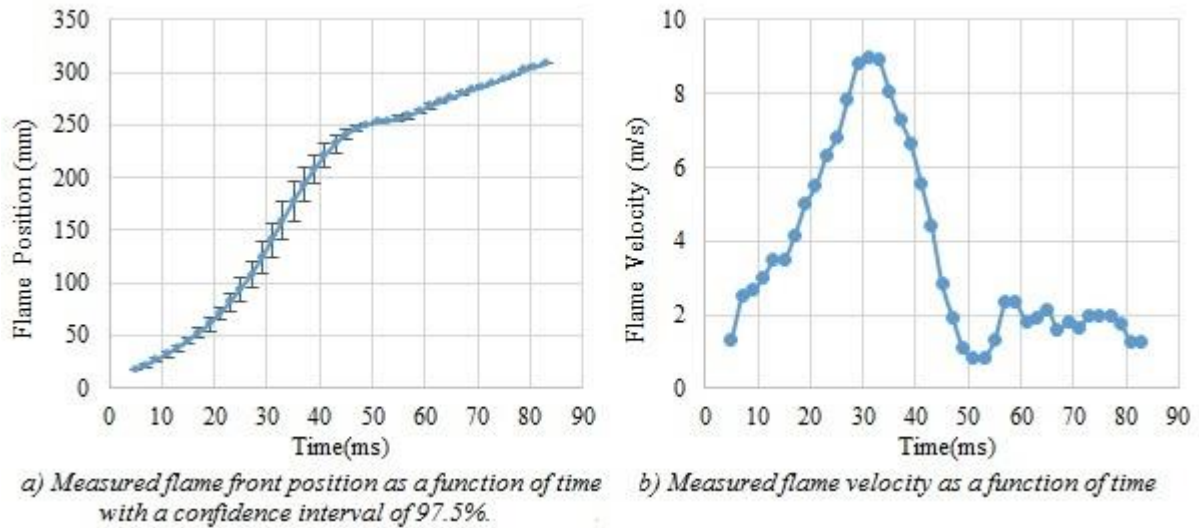


شکل ۵: تصویر پیشروی جبهه شعله در محفظه حاوی مخلوط استوکیومتری متان-هوا در فشار ۱ bar با مقدار ناچیزی ناخالصی بر روی جرقه‌زن (فاصله بین دو تصویر متوالی ۱۰ ms می‌باشد)

Fig. 5. High-speed images of premixed methane-air flame front in closed duct at a pressure of 1 bar with a small amount of impurities on the igniter (the distance between two consecutive images is 10 ms).

برابر ۰/۹۵ bar می‌باشد و سهم متان از این فشار برابر ۰/۱ آن یعنی مقدار ۰/۹۵ bar و فشار جزئی هوا برابر ۰/۹۰۵ می‌باشد. با توجه به رابطه (۵) کسر مولی نهایی متان برابر $C_{ch_4} = 0.095/1 = 0.095$

کاهش داده می‌شود سپس مخلوط پیش‌آمیخته متان-هوا که داری کسر مولی ۰/۱ برای متان است به داخل محفظه تا فشار نهایی ۱ bar به آرامی تزریق می‌گردد. در واقع میزان سهم فشار مخلوط تزریق شده



شکل ۶: موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله بر حسب زمان به همراه فاصله اطمینان ۹۷/۵ درصد

Fig. 6. The flame front position and flame front velocity as a function of time with a confidence interval of 97.5%

۱ bar انجام شده است. جهت اطمینان از صحت کارکرد مجموعه آزمایشگاهی و همچنین بهترین حالت عکس برداری، آزمایش مورد نظر هفت بار تکرار شده که در شکل ۴ و ۵ نتیجه عکس برداری برای دو آزمایش با شرایط یکسان نشان داده شده است. اولین تصویر در زمان ۱۰ ms بوده و گام زمانی تصاویر به ترتیب نیز ۱۰ می باشد. شکل ۴ تصاویر حاصل از عکس برداری از فرآیند انتشار جبهه شعله مخلوط استوکیومتری متان-هوا در شرایط اتاق عکس برداری تاریک را نشان می دهد. نتایج تشکیل گل لاله کلاسیک را که شامل تشکیل شعله کروی، حالت انگشتی، حالت تخت و تشکیل گل لاله است را نشان داده و از لحاظ شکلی و ترتیب مراحل رشد شعله به خوبی با نتایج مشابه [۷ و ۱۵ و ۱۹-۱۷ و ۲۲ و ۲۷-۲۵] هم خوانی داشته و بر اساس نتایج ماتالون و متزنر [۲۶] تخت شدن شعله در وسط کانال (در فاصله ۲۵ cm از محل جرقه) رخ داده است. ابتدا شعله به صورت کروی تشکیل شده و پس از برخورد با دیواره های محفظه حالت انگشتی به خود گرفته و در مرحله بعد شعله به صورت کشیده در آمده و در زمان ۵۰ ms جبهه شعله به طور کامل تخت شده و فرآیند وارونگی جبهه شعله (پدیده گل لاله) آغاز می گردد. در ادامه پیشرفت شعله، شعله گل لاله در جبهه شعله در محدوده زمانی ۸۰ ms به طور کامل تشکیل شده است.

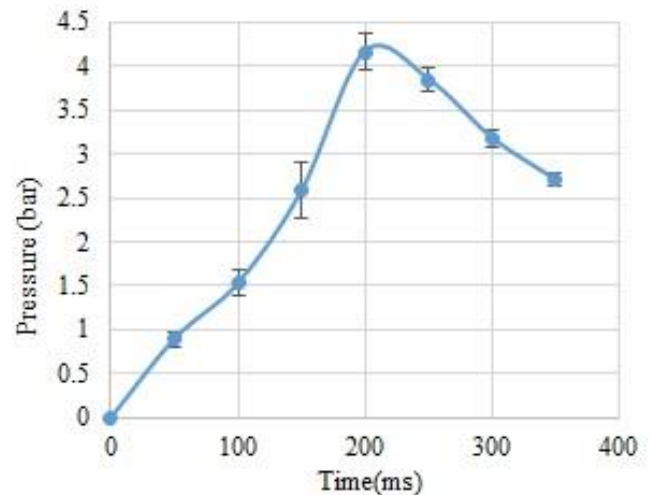
همان طور که در شکل ۴ دیده می شود لبه بالایی گل لاله از لبه پایینی جلو می زند و با نتایج زنگ [۲۲] هم خوانی دارد. با توجه به

و کسر مولی هوا برابر $C_{air} = 0.1905/1 = 0.1905$ شده است. در نتیجه حالت نهایی مخلوط در محفظه آماده برای آزمایش، مخلوط استوکیومتری متان-هوا ($\phi = 1$) است.

۳- نتایج

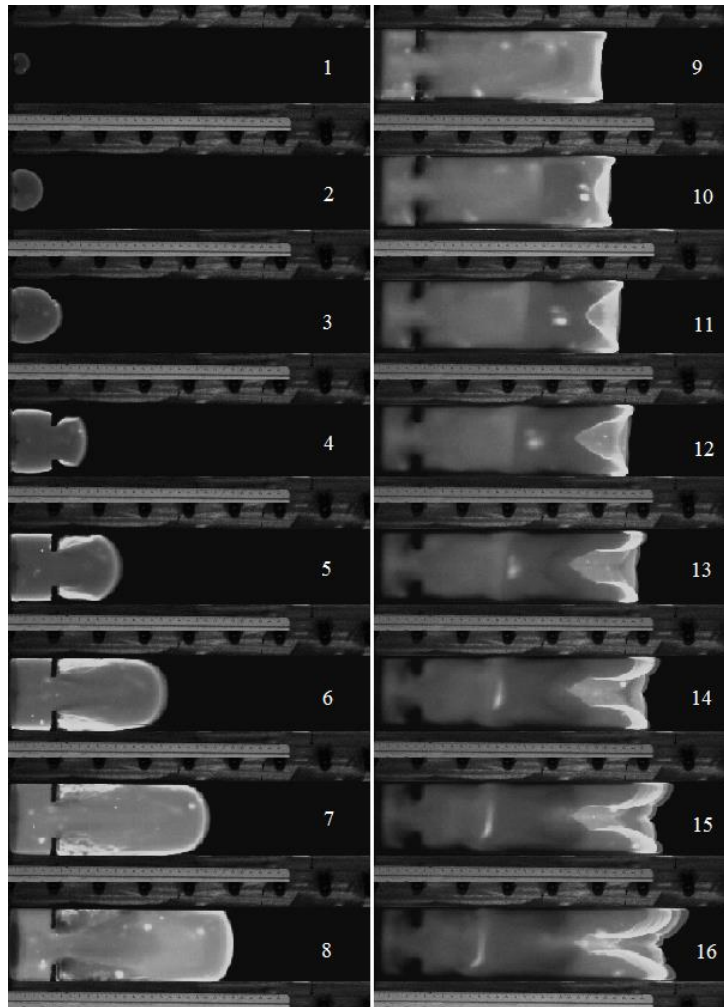
۳-۱- رفتار شعله در محفظه بدون مانع

آزمایش های انجام شده در دمای $25^{\circ}C$ و فشار مخلوط برابر



شکل ۷: تغییرات فشار اندازه گیری شده در داخل محفظه بر حسب زمان با توجه به میانگین مقادیر برای چهار بار تکرار به همراه فاصله اطمینان ۹۷/۵ درصد

Fig. 7. Measured pressure rise inside the combustion chamber as a function of time, with a confidence interval of 97.5%

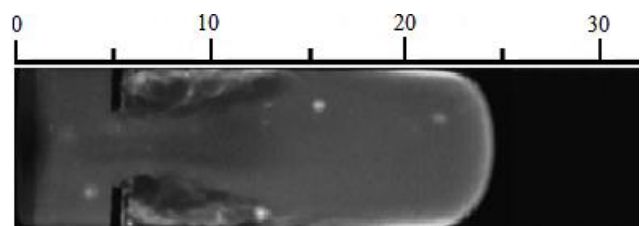


شکل ۸: تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله ۵ cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی ۵ ms می باشد)

Fig. 8. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 5 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).

در شکل ۵ آلودگی ناشی ذرات غبار بر روی جرقه زن در میدان جریان به صورت نقاط نورانی دیده می شوند. این نقاط نورانی به درک بهتر از جریان حاکم بر این پدیده نیز کمک می کند. با توجه و مقایسه دو تصویر جریان در زمان ۴۰ ms و ۵۰ ms که جبهه شعله به شکل تخت تبدیل شده است، جریان برگشتی که در پشت جبهه شعله شکل گرفته به وضوح دیده می شود که می توان به عنوان یکی از علت های اصلی تشکیل شکل لاله ای جبهه شعله از آن نام برد که گنزالس و همکاران [۱۲] به کمک شبیه سازی عددی، جریان برگشتی و تشکیل جریان گردابه ای را در پشت جبهه شعله نشان داده اند.

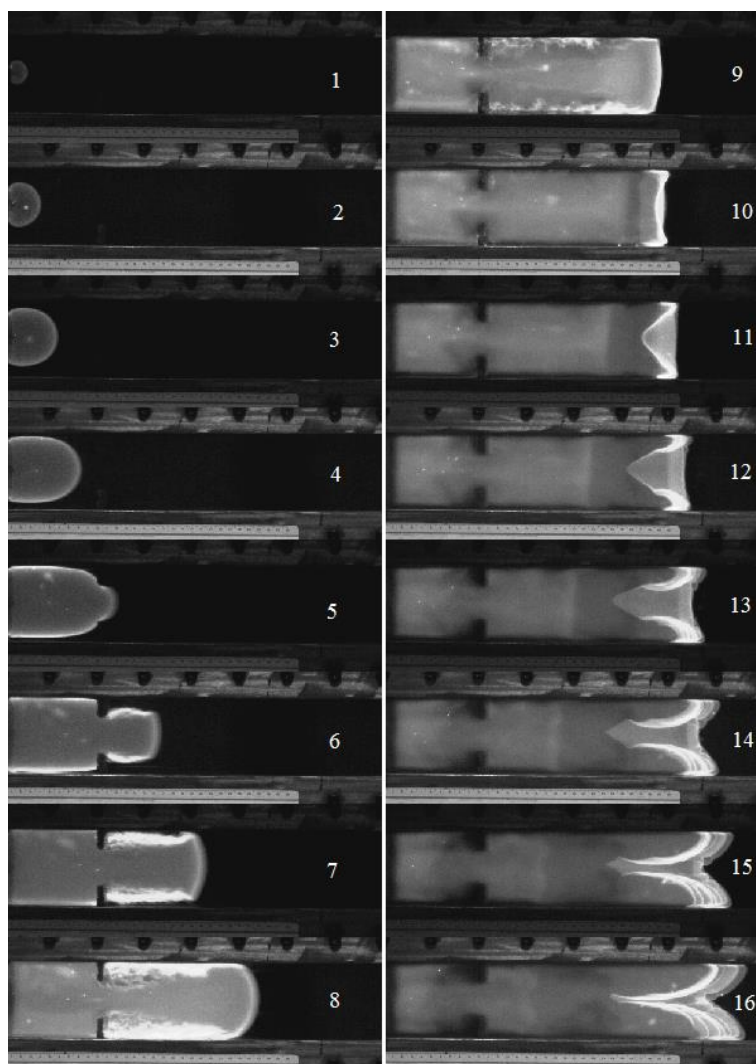
شکل شماره ۶ موقعیت جبهه و سرعت نوک شعله را بر حسب زمان نشان می دهد. در زمان ۵۲ ms و موقعیت شعله در فاصله ۵ cm



شکل ۹: بزرگ نمایی تصویر از آشفته گی ایجاد شده در حالت ۱ و زمان ۴۳ ms

Fig. 9. Image magnification of the turbulence created in case 1 and time 43 ms.

نتایج دان-رانکین [۱۸] دلیل آن سرعت واکنش نسبتاً کند متان و همچنین ابعاد محفظه در پژوهش حاضر بوده که امکان تأثیر نیروی شناوری بر پدیده مورد نظر را فراهم کرده و شکل جبهه شعله به این صورت تغییر شکل داده است.



شکل ۱۰: تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله ۱۰ cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی ۵ ms می‌باشد)

Fig. 10. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 10 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).

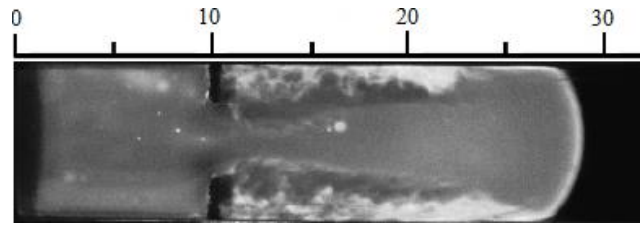
می‌دهد. مقادیر فشار در شکل شماره ۷ حاصل از میانگین مقادیر فشار اندازه‌گیری شده برای چهار بار تکرار آزمایش بوده است و میزان عدم قطعیت با فاصله اطمینان $1/5$ ۹۷ درصد محاسبه و در شکل نشان داده شده است. هم‌خوانی نتایج برای ۴ بار تکرار آزمایش نشان دهنده صحت و دقت قابل قبول برای ابزارهای اندازه‌گیری به کار رفته و همچنین روش مخلوط و تزریق گاز و سیستم جرقه‌زن نیز می‌باشد. حداکثر فشار داخل محفظه در طی این فرآیند در حدود $4/2$ bar می‌باشد که انطباق بسیار خوبی با کار مشابه این پژوهش که توسط دان-رانکین [۱۳] انجام گرفته است داشته و در واقع اعتبارسازی ابزارهای اندازه‌گیری و درستی روش کار حاضر نیز می‌باشد.

۲۵ شیب خط تقریباً صفر شده که نشان‌دهنده توقف شعله به طور لحظه‌ای بوده و با توجه به شکل شعله، همان آغاز تخت شدن جبهه شعله و مقدمه تشکیل شعله گل لاله نیز می‌باشد. شعله در ابتدای رشد خود با سرعت $1/8$ m/s شروع به رشد کرده و از زمان ۱۵ ms تا ۳۰ ms با شتاب ثابت حدوداً 366 m/s^۲ رشد کرده و حداکثر سرعت شعله به مقدار 9 m/s می‌رسد. در ادامه شتاب جبهه شعله منفی شده و سرعت جبهه تا مقدار نزدیک به صفر میل می‌کند. پدیده برگشت جبهه شعله همگام با توقف لحظه‌ای نوک جبهه شعله اتفاق می‌افتد و در ادامه جبهه شعله به شکل گل لاله با سرعت تقریبی 2 m/s به پیش‌روی ادامه می‌دهد.

شکل شماره ۷ تغییرات فشار داخل محفظه بر حسب زمان را نشان

در زمان ۱۰ ms بوده و گام زمانی تصویرها ۵ ms می‌باشد. این چهار حالت جهت مقایسه در کنار هم نمایش داده شده و در هر حالت تنها برای وضوح کامل پدیده از ترکیب رنگ مناسب مربوط به آن استفاده شده است. در هر چهار حالت وجود مانع متخلخل با مقداری تفاوت باعث ایجاد آشفته‌گی در میدان جریان و هم‌چنین جبهه احتراق می‌گردد. حالت ۱ با وجود آشفته‌گی ایجاد شده با توجه به نزدیکی مانع به محل جرقه تأثیر چندانی بر موقعیت تخت شدن شعله و تشکیل شعله گل لاله ندارد و ترتیب رشد جبهه شعله مشابه محفظه بدون مانع بوده است. تشکیل شعله گل لاله در حدود زمان ۴۸ ms و در فاصله ۲۵ cm از محل جرقه شکل می‌گیرد.

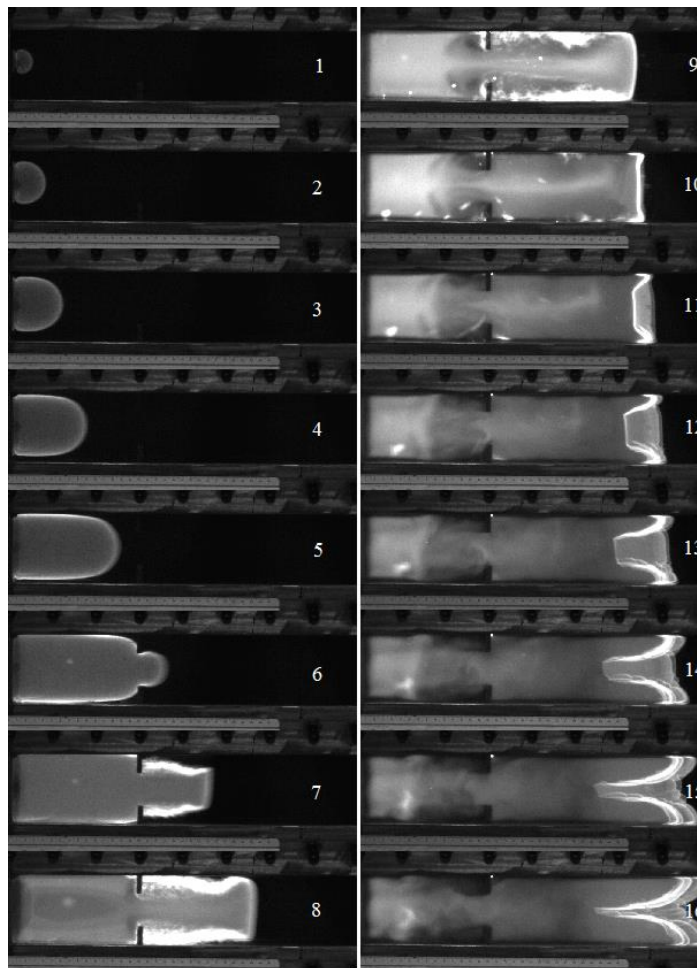
شکل ۸ تصویر شعله در حالت ۱ را نشان می‌دهد که پس از تخت شدن شعله (زمان ۴۸ ms بعد از ایجاد جرقه و فاصله ۲۵ cm از محل



شکل ۱۱: بزرگ‌نمایی تصویر از آشفته‌گی ایجاد شده در حالت ۲ و زمان ۴۸ ms
Fig. 11. Image magnification of the turbulence created in case 2 and time 48 ms.

۲-۳- رفتار شعله در محفظه با حضور مانع متخلخل در مسیر جبهه شعله

نتایج عکس‌برداری برای چهار حالت بیان شده در شکل‌های ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ نشان داده شده است. اولین تصویر در تمامی حالت‌ها

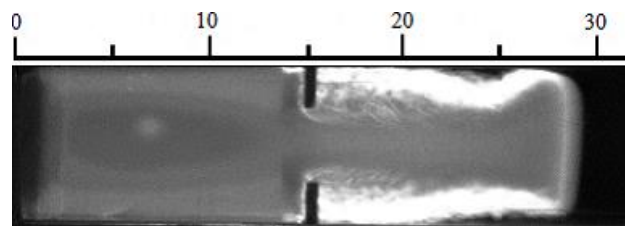


شکل ۱۲: تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله ۱۵ cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی ۵ ms می‌باشد)

Fig. 12. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 15 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).

شکل ۹ بزرگ نمایی برای حالت ۱ در زمان ۴۳ ms را نشان می‌دهد و آشفته‌گی ایجاد شده حاصل از مانع متخلخل که به صورت گردابه‌ای و قرینه است در پشت مانع دیده می‌شود. همان‌طور که در تصویرهای ۸ و ۹ دیده می‌شود، جریان محصولات احتراق بعد از سرعت گرفتن، در داخل مانع متخلخل نفوذ کرده و مقدار قابل توجهی از آن عبور می‌کند.

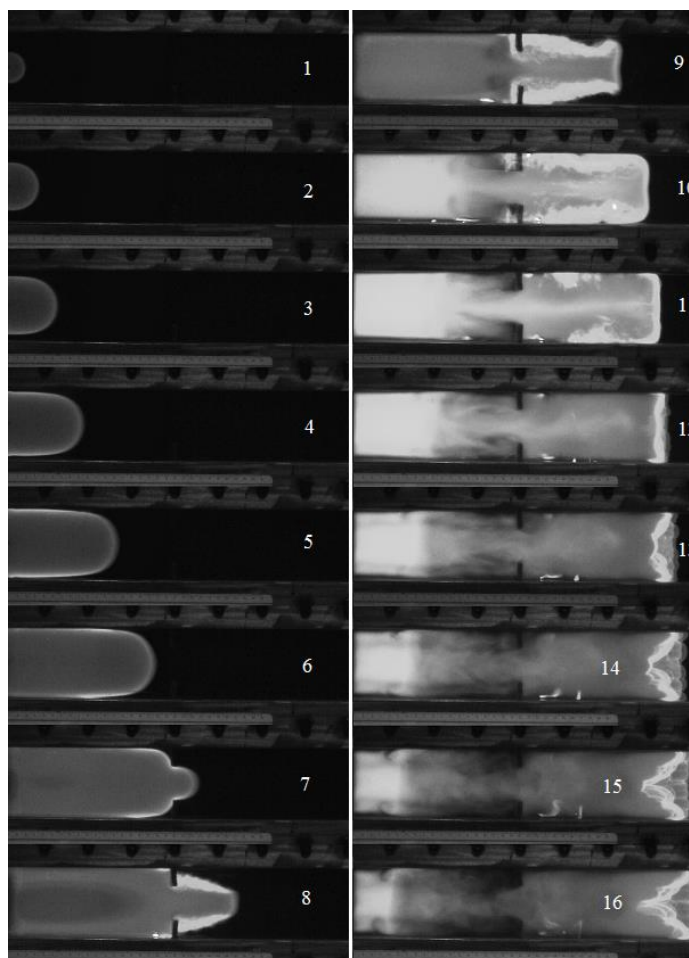
شکل ۱۰ تصویر شعله در حالت ۲ را نشان می‌دهد که در ظاهر تفاوت بسیار کمی با حالت ۱ داشته ولی میزان آشفته‌گی ایجاد شده در میدان جریان و بخصوص در لایه مرزی نزدیک دیواره که نقش اساسی در پدیده برگشت شعله دارد بیشتر شده است. دلیل افزایش میزان آشفته‌گی نسبت به حالت ۱ فاصله بیشتر مانع از محل جرقه و در نتیجه برخورد جبهه شعله به مانع با سرعت بیشتر بوده و این آشفته‌گی



شکل ۱۳: بزرگ‌نمایی تصویر از آشفته‌گی ایجاد شده برای حالت ۳ در زمان ۴۵ ms

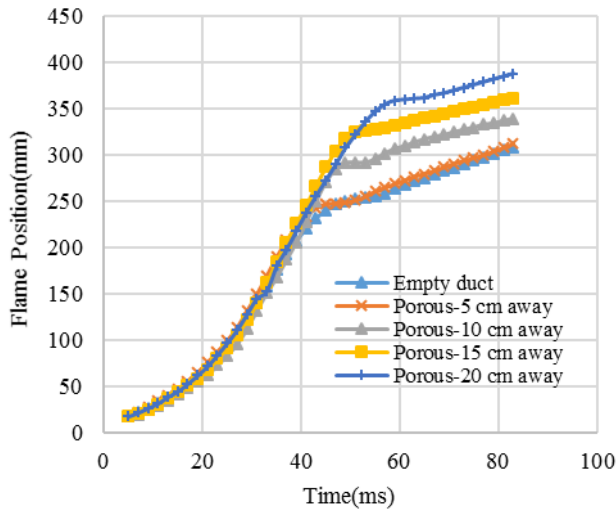
Fig. 13. Image magnification of the turbulence created in case 3 and time 45 ms.

جرقه) و آغاز تشکیل شعله گل لاله، جریان برگشتی ایجاد شده که در تصاویر دیده می‌شود. در این حالت از قسمت شماره ۹ شکل شعله، حالت برگشت جبهه شعله آغاز شده و در ادامه فرآیند پیشروی شعله، جریان برگشتی نیز به وضوح دیده می‌شود.



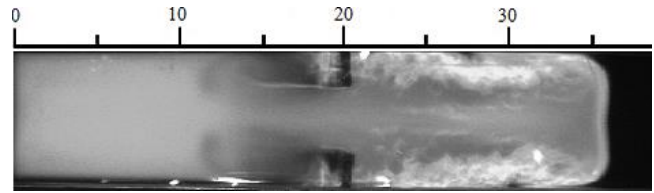
شکل ۱۴: تصویر جبهه شعله همراه با مانع متخلخل در فاصله ۲۰ cm از محل جرقه (فاصله بین دو تصویر متوالی ۵ ms می‌باشد)

Fig. 14. The flame front images with the porous obstacles at a distance of 20 cm from the spark plug (The time interval between consecutive images is 5 ms).



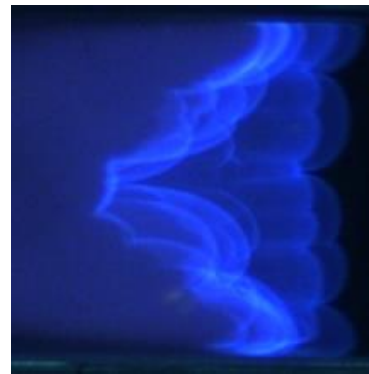
شکل ۱۷: موقعیت جبهه شعله بر حسب زمان برای پنج حالت مختلف

Fig. 17. The position of the flame front as a function of time for five different cases.



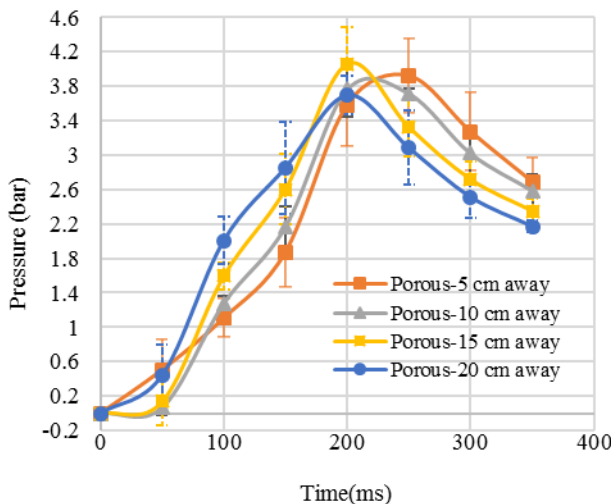
شکل ۱۵: بزرگ‌نمایی تصویر از آشفته‌گی ایجاد شده در حالت ۴ و زمان ۵۵ ms

Fig. 15. Image magnification of the turbulence created in case 4 and time 55 ms.



شکل ۱۶: بزرگ‌نمایی تصویر جبهه شعله در حالت ۴ و زمان ۷۹ ms

Fig. 16. Image magnification of the flame front created in case 4 and time 78 ms



شکل ۱۸: میانگین تغییرات فشار بر حسب زمان برای حالت‌های ۱، ۲، ۳، ۴ به همراه فاصله اطمینان ۹۷/۵ درصد

Fig. 18. Measured pressure inside the chamber as a function of time for five different cases with a confidence interval of 97.5%.

در پشت جبهه شعله وجود داشته و همان‌طور که در تصویر شماره ۱۲ دیده می‌شود تغییر قابل توجهی بر نحوه برگشت جبهه شعله و ترکیب شکل گل لاله گذاشته است و دیده می‌شود که جبهه شعله برگشتی حالت کاملاً تخت به خود گرفته است. در صورتی که در حالت‌های ۱ و ۲ جبهه برگشتی مثلثی شکل بوده است.

شکل ۱۴ تصویر شعله در حالت ۴ می‌باشد. همان‌طور که در

در تصویر شماره ۱۱ دیده می‌شود. در این حالت تخت شدن جبهه شعله در حدود فاصله ۲۹ cm از محل جرقه و زمان ۵۱ ms ایجاد شده است. با مقایسه دو حالت ۱ و ۲ مشاهده می‌شود که آشفته‌گی ایجاد شده در میدان جریان به وضوح موجب به تأخیر افتادن پدیده شعله گل لاله شده است. در این حالت نیز از قسمت شماره ۱۰ شکل شعله، حالت برگشت جبهه شعله آغاز شده و جریان برگشتی ایجاد شده در ادامه پیشروی جبهه شعله، مشاهده می‌شود.

شکل ۱۲ تصویر شعله در حالت ۳ می‌باشد و همان‌طور که دیده می‌شود ظاهر جبهه شعله کمی متفاوت بوده و میزان آشفته‌گی ایجاد شده در میدان جریان و همچنین لایه مرزی نزدیک دیواره از دو حالت قبل بیشتر است. به دلیل آشفته‌گی نسبتاً شدید که در شکل ۱۳ بزرگ‌نمایی آن نشان داده شده، جبهه شعله در بازه زمانی ۴۵ ms تا ۵۱ ms از فاصله ۲۷ cm تا ۳۲ cm به صورت تخت پیشروی داشته و سپس حالت برگشت شعله شکل می‌گیرد. تنها این حالت در زمان تست همراه با تولید صدای صوت مانند همراه بوده است. در این حالت، متفاوت از دو حالت قبل در زمان تشکیل گل لاله آشفته‌گی‌ها

دلیل برخورد موج‌های فشاری با مانع و دیواره‌های محفظه تغییرات نامنظمی داشته و در این چیدمان الگوی خاصی ندارد جز مقدار حداکثر فشار که در پنج حالت در حدود زمان ۲۰۰ ms رخ داده و همچنین در چهار حالت با حضور مانع متخلخل مقدار حداکثر فشار نسبت به حالت محفظه بدون مانع برای حالت ۱: ۶ درصد کاهش، برای حالت ۲: ۹ درصد کاهش، برای حالت ۳: ۳ درصد کاهش و برای حالت ۴ مقدار ۱۱ درصد کاهش داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر مانع متخلخل در مسیر جریان احتراق در یک محفظه بسته به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج نشان می‌دهد که: الف) آشفته‌گی ایجاد شده در میدان جریان توسط مانع متخلخل نقش اساسی در الگوی رشد جبهه شعله و سرعت احتراق دارد. در واقع انسداد ایجاد شده در مسیر جریان از دو نظر دارای اهمیت است: اول اینکه کاهش رینولدز شعله موجب افزایش نرخ سوزش و شتاب جبهه شعله می‌شود، دوم اینکه انسداد موجب افزایش رینولدز جریان و آشفته شدن آن می‌گردد که این خود به افزایش سطح جبهه شعله کمک کرده و نرخ سوزش را افزایش می‌دهد. ب) آشفته‌گی ایجاد شده در جریان احتراقی به موقعیت مکانی مانع متخلخل در مسیر جریان وابسته بوده و با افزایش فاصله مانع از محل اعمال جرقه میزان آشفته‌گی ایجاد شده افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سرعت برخورد جبهه شعله و محصولات احتراق با مانع متخلخل می‌باشد. ج) الگویی تغییرات فشار داخل محفظه بسته برای پنج حالت مورد آزمایش مشابه بوده و مقدار حداکثر فشار محفظه در حدود زمان ۲۰۰ ms رخ داده است. د) حداکثر فشار محفظه با حضور مانع در چهار حالت، نسبت به حالت بدون حضور مانع به ترتیب: ۶، ۹، ۳ و ۱۱ درصد کاهش داشته است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	جرم هوا، kg
C	کسر مولی، 1
F	جرم سوخت، kg
n	تعداد مول گاز

شکل دیده می‌شود این حالت آشفته‌ترین شکل جریان را به خود گرفته و بزرگ‌نمایی تصویر در زمان ۵۵ ms در شکل ۱۵ نشان داده شده و جریان برگشتی شدیدی که ایجاد شده نیز در آن به وضوح دیده می‌شود. جبهه شعله در بازه زمانی ۵۰ ms تا ۶۰ ms از فاصله ۳۱ cm تا ۳۶ cm به صورت تخت پیشروی کرده و در نهایت جبهه شعله مشابه شعله گل لاله تشکیل می‌شود. در حالت‌های ۳ و ۴ جریان برگشتی نسبتاً شدیدی ایجاد شده که دلیل آن سرعت زیاد جبهه شعله هنگام برخورد با مانع متخلخل و ایجاد آشفته‌گی شدید در میدان جریان احتراقی بوده است. حالت ۴ شکل نهایی جبهه شعله متفاوت از شعله گل لاله شده است که بزرگ‌نمایی آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

شکل ۱۷ موقعیت مکانی جبهه شعله بر حسب زمان را برای پنج حالت مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل در پدیده شعله گل لاله و تخت شدن شعله، سرعت جبهه شعله به نزدیکی صفر میل می‌کند که این فرایند در منحنی تغییرات موقعیت شعله به صورت شیب صفر در منحنی دیده می‌شود و با توجه به آن تشکیل جبهه شعله تخت به عنوان مقدمه تشکیل شعله گل لاله، در حالت محفظه بدون مانع در فاصله ۲۵ cm (زمان ۵۰ ms)، حالت شماره ۱ در فاصله ۲۵ cm (زمان ۴۸ ms)، برای حالت شماره ۲ در فاصله ۲۹ cm (زمان ۵۱ ms)، برای حالت شماره ۳ در فاصله ۳۲ cm (زمان ۵۱ ms) و برای حالت شماره ۴ در فاصله ۳۶ cm (زمان ۶۰ ms) از محل جرقه آغاز می‌گردد.

در زمان ۴۰ میلی ثانیه موقعیت مکانی نوک شعله برای تمامی حالت‌ها تقریباً در فاصله ۲۳۰ mm از محل جرقه واقع شده است. دیده می‌شود که ایجاد انسداد توسط مانع متخلخل فرایند شتاب گیری اولیه شعله را ادامه دار کرده است. برای حالت فاصله مانع در ۵ cm به دلیل برخورد شعله در مراحل اولیه رشد آن با مانع آشفته‌گی نسبتاً کمی در میدان جریان ایجاد شده و هیچ گونه تأثیری بر فرآیند شتاب گرفتن شعله نداشته است. برای حالت‌های بعدی (۲۰-۱۵-۱۰) با بیشتر شدن فاصله (در واقع بیشتر شدن سرعت شعله هنگام برخورد با مانع) میزان آشفته‌گی ایجاد شده در میدان جریان احتراقی بیشتر شده و این امر موجب ادامه دار شدن شتاب‌گیری جبهه شعله شده است.

شکل ۱۸ میانگین تغییرات فشار بر حسب زمان برای چهار حالت نشان داده شده است. تغییرات فشار برای حالت‌های مختلف به

- [9] V.y. Akkerman, V. Bychkov, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Flame oscillations in tubes with nonslip at the walls, *Combustion and Flame*, 145(4) (2006) 675-687.
- [10] O.d.C. Ellis, Flame movement in gaseous explosive mixtures, *J. Fuel Sci.*, 7 (1928) 502-508.
- [11] M. Gonzalez, Acoustic instability of a premixed flame propagating in a tube, *Combustion and Flame*, 107(3) (1996) 245-259.
- [12] M. Matalon, Flame dynamics, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(1) (2009) 57-82.
- [13] G. Salamandra, T. Bazhenova, I. Naboko, Formation of detonation wave during combustion of gas in combustion tube, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1958, pp. 851-855.
- [14] G. Markstein, A shock-tube study of flame front-pressure wave interaction, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1957, pp. 387-398.
- [15] R. Starke, P. Roth, An experimental investigation of flame behavior during cylindrical vessel explosions, *Combustion and Flame*, 66(3) (1986) 249-259.
- [16] D. Dunn-Rankin, P. Barr, R. Sawyer, Numerical and experimental study of "tulip" flame formation in a closed vessel, in: *Symposium (International) on Combustion*, Elsevier, 1988, pp. 1291-1301.
- [17] M. Gonzalez, R. Borghi, A. Saouab, Interaction of a flame front with its self-generated flow in an enclosure: The "tulip flame" phenomenon, *Combustion and Flame*, 88(2) (1992) 201-220.
- [18] D. Dunn-Rankin, R. Sawyer, Tulip flames: changes in shape of premixed flames propagating in closed tubes, *Experiments in fluids*, 24(2) (1998) 130-140.
- [19] H. Xiao, Q. Wang, X. He, J. Sun, X. Shen, Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagating in horizontal duct, *international journal of hydrogen energy*, 36(10) (2011) 6325-6336.
- [20] H. Xiao, Q. Duan, L. Jiang, J. Sun, Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation

P فشار، bar

U_f سرعت شعله، m/s

علائم یونانی

ϕ نسبت هم ارزی

ρ دانسیته، kg/m^3

σ شتاب بی بعد شعله،

Θ نسبت چگالی مخلوط نسوخته به مخلوط سوخته

زیرنویس

act حالت واقعی

i گونه i ام

stoic حالت استوکیومتری

T مجموع گونه‌های مخلوط

مراجع

- [1] H.M. Cho, B.-Q. He, Spark ignition natural gas engines—A review, *Energy conversion and management*, 48(2) (2007) 608-618.
- [2] V. Bychkov, V.y. Akkerman, G. Fru, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Flame acceleration in the early stages of burning in tubes, *Combustion and Flame*, 150(4) (2007) 263-276.
- [3] K. Shelkin, KI Shelkin, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 10, 823 (1940), *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 10 (1940) 823.
- [4] Bychkov, A. Petchenko, V.y. Akkerman, L.-E. Eriksson, Theory and modeling of accelerating flames in tubes, *Physical Review E*, 72(4) (2005) 046307.
- [5] L. Landau, E. Lifshitz, *Fluid mechanics*, sec 60, in, Pergamon Press, Oxford, 1989.
- [6] F.A. Williams, *Combustion Theory*, (1985), Cummings Publ. Co, (1985).
- [7] C. Clanet, G. Searby, On the "tulip flame" phenomenon, *Combustion and Flame*, 105(1-2) (1996) 225-238.
- [8] D. Valiev, V. Bychkov, V.y. Akkerman, C.K. Law, L.-E. Eriksson, Flame acceleration in channels with obstacles in the deflagration-to-detonation transition, *Combustion and Flame*, 157(5) (2010) 1012-1021.

- hazardous materials, 327 (2017) 116-126.
- [24] P. Chen, F. Huang, Y. Sun, X. Chen, Effects of metal foam meshes on premixed methane-air flame propagation in the closed duct, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47 (2017) 22-28.
- [25] V.y. Akkerman, V. Bychkov, A. Petchenko, L.-E. Eriksson, Accelerating flames in cylindrical tubes with nonslip at the walls, *Combustion and Flame*, 145(1-2) (2006) 206-219.
- [26] M. Matalon, P. Metzener, The propagation of premixed flames in closed tubes, *Journal of Fluid Mechanics*, 336 (1997) 331-350.
- [27] B. Ponizy, A. Claverie, B. Veysi re, Tulip flame-the mechanism of flame front inversion, *Combustion and Flame*, 161(12) (2014) 3051-3062.
- in a closed combustion tube, *international journal of hydrogen energy*, 39(16) (2014) 8557-8563.
- [21] X. Shen, X. He, J. Sun, A comparative study on premixed hydrogen-air and propane-air flame propagations with tulip distortion in a closed duct, *Fuel*, 161 (2015) 248-253.
- [22] K. Zheng, M. Yu, L. Zheng, X. Wen, T. Chu, L. Wang, Experimental study on premixed flame propagation of hydrogen/methane/air deflagration in closed ducts, *international journal of hydrogen energy*, 42(8) (2017) 5426-5438.
- [23] K. Jin, Q. Duan, K. Liew, Z. Peng, L. Gong, J. Sun, Experimental study on a comparison of typical premixed combustible gas-air flame propagation in a horizontal rectangular closed duct, *Journal of*

